

УДК 524.35-377:524.4

# ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД. I. СКОПЛЕНИЯ УМЕРЕННОГО ВОЗРАСТА

© 2024 И. И. Романюк<sup>1\*</sup>, И. А. Якунин<sup>1</sup>, А. В. Моисеева<sup>1</sup>,  
Е. А. Семенко<sup>1,2</sup>, Д. О. Кудрявцев<sup>1</sup>, В. Н. Аитов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Национальный институт астрономических исследований Таиланда, Чиангмай, 50180 Таиланд

Поступила в редакцию 14 ноября 2023 года; после доработки 4 декабря 2023 года; принята к публикации 5 декабря 2023 года

Химически пекулярные звезды (CP) ранних спектральных классов являются единственными объектами главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рессела, которые обладают сильными магнитными полями, охватывающими всю поверхность звезды и сохраняющими стабильное строение на масштабе, как минимум, десятилетий. Происхождение и эволюция магнитных полей этих объектов до сих пор являются предметом обсуждения, несмотря на значительный прогресс в области наблюдения звездных магнитных полей и их теоретического описания. Такая ситуация сложилась не в последнюю очередь из-за проблемы точного определения возраста. Мы выполнили обзор магнитных полей Ar/Vr-звезд в ассоциации Орион OB1 и четырех скоплениях умеренного возраста ( $\alpha$  Per, Плеяды, NGC 7092 и IC 4756) и нашли свидетельства резкого падения доли и величины магнитного поля CP-звезд относительно нормальных звезд тех же спектральных классов. Найденные зависимости могут служить подтверждением реликтовой природы крупномасштабного магнитного поля звезд. Выводы настоящей статьи основаны на результатах измерения более 800 спектров, полученных в период с 2013 по 2023 гг. на Основном звездном спектрографе 6-м телескопа БТА примерно для 100 звезд.

Ключевые слова: *звезды: магнитное поле — звезды: химически пекулярные*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Примерно у 10–15% звезд, которые населяют верхнюю часть главной последовательности (ГП) диаграммы Герцшпрунга–Рессела (ГР), найдены сильные и стабильные, охватывающие всю поверхность, магнитные поля (см. обзоры Wade et al., 2016; Grunhut et al., 2017; Schöller et al., 2017). Все эти звезды без исключения имеют аномальные спектры и в подавляющем большинстве случаев могут быть отнесены к классу химически пекулярных (CP) (Preston, 1974). Аномалии заключаются в необычном усилении или ослаблении спектральных линий определенных химических элементов в сравнении с нормальными звездами того же спектрального класса вследствие атомной диффузии (Michaud, 1970). В последнее время диапазон спектральных классов звезд, которые обладают крупномасштабным магнитным полем, был расширен от F0 до O4 благодаря обзорам MiMeS (Magnetism in Massive Stars, Grunhut et al., 2017;

Wade et al., 2016) и BoB (B fields in OB stars, Schöller et al., 2017).

Наиболее полный каталог CP-звезд, составленный Renson and Manfroid (2009), содержит сведения примерно о 8200 объектах, однако не все они являются магнитными. После исключения из рассмотрения объектов, которые в целом не показывают присутствия магнитного поля (звезды типа Am и HgMn, Aurière et al., 2010; Makaganiuk et al., 2011), в каталоге остается более 4200 потенциально магнитных CP-звезд.

Отнесение звезды к классу магнитных во многом определяется точностью детектирования магнитного поля и его строением. Поле должно носить глобальный характер и оставаться стабильным в течение длительного срока (многие циклы осевого вращения). Верхний предел величины магнитного поля обусловлен наблюдениями и составляет 34 кГс у звезды HD 215441 (Babcock, 1960), нижний же предел определяется несколькими факторами.

В физическом плане на точность измерения влияет эффективная температура звезды и ее вра-

\*E-mail: roman@sao.ru

шение, тем самым ограничивая количество линий, доступных для измерения. В инструментальном плане точность зависит от отношения сигнал/шум в данных и спектрального разрешения прибора. Метод измерения эффекта Зеемана также накладывает свои ограничения. Для холодных CP-звезд с большим количеством линий в спектре ошибки измерения поля составляют порядка нескольких десятков Гаусс, что приводит к нижней границе обнаружения поля для ОЗСП около 100 Гс. Для горячих звезд эта величина находится в районе 500 Гс.

Вопрос того, что считать нижней границей величины магнитного поля CP-звезд, непосредственно связан с проблемой существования так называемой магнитной пустыни (magnetic desert), поднятой Aurière et al. (2007). Выполнив измерения продольного магнитного поля 28 объектов с максимально возможной на тот момент точностью, авторы показали, что у всех исследованных звезд в дипольном приближении поле  $B_d$  на полюсе диполя оказалось более 300 Гс. Поля величиной в десятки Гаусс найдено не было. Для объяснения выявленной закономерности авторы предположили, что существует некая критическая величина поля  $B_c \approx 300$  Гс, ниже которой глобальная магнитная конфигурация поля будет неустойчивой. Несколько позже Lignières et al. (2014) на более обширном материале подтвердили, что существование магнитной пустыни не связано с точностью измерения магнитного поля.

Для большинства ярких звезд с незначительным вращательным уширением линий точность составляет порядка нескольких Гаусс, что соответствует  $3\sigma$  пределам детектирования современных спектрополяриметров. Однако еще более слабое поле величиной около Гаусса не редкость у нормальных A- или Am-звезд (например, Vega — Petit et al. (2010), Sirius A — Petit et al. (2011)). Fossati et al. (2015) изучили геометрию магнитного поля выборки массивных звезд и пришли к выводу, что для них границы магнитной пустыни более размыты, чем для CP-звезд промежуточных масс. Однако последний вывод не нашел подкрепления в работе Sikora et al. (2019b). Makarenko et al. (2021) построили функцию распределения магнитного поля для всех известных ОВА-звезд и показали, что полученные зависимости могут быть описаны логарифм-нормальным законом.

При оценке распространенности магнитных полей важно иметь в виду, что поиск был выполнен не для всех CP-звезд из каталога Renson and Manfroid (2009). Порядка половины объектов в нем никогда не исследовалась, а наиболее полный список звезд с надежно обнаруженным полем состоит из порядка 800 записей (M. Shultz, private communication). Среди множества работ, направленных в том числе и на оценку частоты

встречаемости магнитных полей у звезд верхней части ГП, мы выделим несколько, которые имеют непосредственное отношение к задачам нашего исследования.

Ограничившись областью Галактики радиусом  $d \geq 100$  пк от Солнца, Sikora et al. (2019a) отобрали 206 представленных в каталоге Renson and Manfroid (2009) CP-звезд с эффективной температурой  $T_{\text{eff}} \geq 7000$  К. По собственным наблюдениям и опираясь на ранее опубликованные данные авторы подтвердили наличие магнитного поля у 52 звезд, что соответствует 25% от общей выборки. Также авторы обнаружили резкое увеличение доли магнитных CP-звезд с увеличением массы. Подробному исследованию массивных представителей класса CP-звезд был посвящен обзор MiMeS (Wade et al., 2016) и BoB (Schöller et al., 2017). В частности, для наиболее массивных и молодых O-звезд частота встречаемости магнитных полей была найдена как  $(7 \pm 3)\%$  со средней ошибкой измерения продольной компоненты магнитного поля всего 50 Гс (Grunhut et al., 2017) и для OB-звезд —  $(6 \pm 3)\%$  (Schöller et al., 2017). Интересно, что примерно с такой же частотой встречаются магнитные объекты Ae/Be Хербига (Alecian et al., 2013).

Bagnulo et al. (2006), Landstreet et al. (2007), Landstreet et al. (2008) опубликовали серию работ по изучению магнитного поля 235 CP-звезд в скоплениях разного возраста. Данные о поле были получены на спектрополяриметре FORS1 8-м телескопа VLT с разрешением  $R = 2000$  и — небольшая часть — на спектрополяриметре высокого разрешения ESPaDOnS. Авторы обнаружили, что величина магнитного поля у звезд с массами  $M > 3M_{\odot}$  в течение жизни звезды на ГП падает в несколько раз за время порядка  $3 \times 10^7$  лет, а поле менее массивных объектов падает не так резко и за более долгий промежуток времени —  $2.5 \times 10^8$  лет. На наш взгляд, в этом исследовании имелся существенный недостаток — продольная компонента магнитного поля почти для всех объектов была измерена по одному разу в случайную фазу периода вращения. Поскольку эта величина меняется по мере вращения звезды, то такой подход становится оправдан только в случае накопления достаточно большой статистики.

Прогресс, достигнутый в последние десятилетия в изучении магнитных полей CP-звезд, позволяет еще больше приблизиться к разгадке одной из наиболее актуальных проблем в этой области и ответить на вопрос о происхождении магнетизма звезд верхней части ГП. Почему в одном и том же диапазоне масс и эффективных температур примерно 10% звезд ранних спектральных классов обладают магнитным полем, а остальные — нет?

Современные результаты наблюдений указывают на преимущественно реликтовое происхождение магнитного поля (Bagnulo et al., 2006; Landstreet et al., 2007; 2008; Sikora et al., 2019b), однако они не могут объяснить все наблюдаемые проявления магнетизма CP-звезд. Основная трудность заключается в определении их возраста: для одиночных звезд поля ошибки достигают 50% и более. Существенно лучше обстоят дела для звезд, которые являются членами скоплений, особенно для тех, что находятся в первой половине своей жизни на ГП (Bagnulo et al., 2006). Вторая причина заключается в малом количестве и неоднородном характере магнитных наблюдений.

Пытаясь прояснить вопросы происхождения и эволюции магнитного поля химически пекулярных звезд и учитывая сложившуюся ситуацию с наблюдательными ограничениями, мы предложили исследовать максимально большое количество звезд из состава ассоциаций и рассеянных скоплений разного возраста, применяя единую методику наблюдений, обработки и анализа данных. Для исследования были отобраны скопления, содержащие как минимум несколько CP-звезд ранних спектральных классов, которые были бы доступны для наблюдений на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории.

Первым этапом нашей новой работы стало масштабное изучение магнитного поля CP-звезд в ассоциации Орион OB1 (Romanyuk et al., 2013; 2016; 2017; 2019; 2021a,b; Moiseeva et al., 2019; Semenko et al., 2019; 2022; Ismailov et al., 2021; Moiseeva et al., 2022). В дальнейшем мы обратили внимание на рассеянное скопление Плеяды и одноименную кинематическую группу (Romanyuk et al., 2023a), а также на скопления  $\alpha$  Per, NGC 7092 и IC 4756 (Romanyuk et al., 2023b).

Данной публикацией мы подводим промежуточные итоги продолжающегося обзора. В разделе 2 мы подробно рассматриваем использованные методы получения, обработки и анализа данных. В разделе 3 продемонстрированы основные результаты нашего анализа, а в разделе 4 сформулированы основные выводы исследования.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ МАГНЕТИЗМА CP-ЗВЕЗД

### 2.1. Спектрополяриметрия на БТА

Наблюдательная часть нашего исследования реализуется на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории с использованием Основного звездного спектрографа<sup>1)</sup> (ОЗСП;

Panchuk et al. 2014) в режиме спектрополяриметрии с анализатором круговой поляризации (Chountonov, 2016). Наблюдения продолжаются более десяти лет при фактически постоянной конфигурации прибора. Обработка спектральных данных все это время выполняется по единой методике для всех объектов с использованием контекста ZEEMAN (Kudryavtsev, 2000) системы ESO-MIDAS. Остальные подробности получения данных, как и методика измерения магнитного поля, были изложены, например, в работах Semenko et al. (2014, 2022).

### 2.2. Магнитное поле CP-звезд

Техника одновременной регистрации двух спектров в ортогональных круговых поляризациях позволяет непосредственно измерять проявления эффекта Зеемана в спектрах звезд и тем самым оценить их продольный компонент магнитного поля  $B_e$  (см. формулы в Babcock, 1958), усредненный по всей видимой в момент наблюдения поверхности звезды. Продольное поле  $B_e$  зависит от его реальной геометрии, меняется по мере вращения звезды вокруг своей оси и может равняться нулю, даже если звезда обладает сильным магнитным полем. Вопросы о том, какую реальную величину магнитного поля следует приписать звезде и как эти величины сравнивать между звездами, возникают каждый раз при статистическом исследовании магнетизма CP-звезд. Переменность  $B_e$  достаточно просто интерпретируется в модели наклонного ротатора (Stibbs, 1950), в которой глобальное магнитное поле звезды имеет форму диполя. Простые конфигурации, такие как диполь, квадруполь или их комбинации, можно промоделировать имея фазовую кривую изменения  $B_e$ . Для этого необходимо провести наблюдения звезды не менее 6–7 раз в разные фазы периода вращения, а затем на основе наблюдений можно рассчитать модель наклонного ротатора и найти величину магнитного поля в любой точке поверхности. Однако такой подход возможен только в случае звезд с известными периодами вращения.

Вплоть до начала 2020-х годов количество CP-звезд с хорошо известным поведением продольного магнитного поля было значительно меньше размера всей выборки известных магнитных звезд (Buchkov et al., 2021). Со временем, из-за возросшей доступности и точности спутниковой фотометрии, ситуация коренным образом изменилась. Благодаря наблюдениям на спутнике TESS наши знания о вращении CP-звезд сильно улучшились (например, Hümmerich et al., 2018). Фотометрические наблюдения CP-звезд показывают, что большинство таких звезд, скорее всего, имеют дипольную конфигурацию магнитного поля

<sup>1)</sup><https://www.sao.ru/hq/lizm/mss/en/index.html>

(Jagelka et al., 2019). К похожим выводам приводят и данные спектроскопии (Kochukhov, 2020). Расширение комбинированных исследований на большую выборку магнитных CP-звезд позволяет более адекватно судить о величине магнитного поля тех или иных объектов (Yakunin et al., 2023).

В задачи нашей работы не входило определение периодов вращения звезд выборки. Поэтому для характеристики магнитного поля мы используем величину среднеквадратического продольного поля  $B_{rms}$ , его ошибки  $\sigma_{rms}$  и критерия  $\chi^2/n$  (формулы (1)–(3) в Romanuk et al., 2023a). Достоверно судить об обнаружении магнитного поля можно при значении критерия  $\chi^2/n \geq 5$ . Такая методика используется многими исследователями из-за невозможности получить более обширный наблюдательный материал (Landstreet et al., 2007).

### 2.3. Магнитное поле скоплений

Методы оценки среднего магнитного поля скопления по CP-звездам требуют отдельного рассмотрения. Во-первых, встречаемость CP-звезд в разных скоплениях относительно остальных звезд того же спектрального класса различна. В большинстве случаев речь идет лишь о нескольких членах скопления с известным магнитным полем, что снижает статистическую значимость выводов. Во-вторых, среди химически пекулярных звезд есть некоторая доля объектов, у которых магнитное поле не было зарегистрировано с требуемой точностью, или его нет вовсе. Результат усреднения поля скопления исключительно по всем CP-звездам будет сильно зависеть от числа *bona fide* магнитных звезд. Наличие в скоплении CP-звезд, традиционно считающихся «немагнитными» (Am и HgMn), способно сильно исказить итоговую статистику. Чтобы максимально учесть все перечисленные факторы, влияющие на достоверность статистических выводов, мы отобрали для наблюдений 17 рассеянных скоплений разного возраста, в которых имеется хотя бы по три CP-звезды. В качестве источника информации о наличии химических пекулярных звезд в скоплениях мы использовали базу данных WEBDA (Mermilliod et al., 1997). Информация о типе химических аномалий была взята из каталога Renon and Manfroid (2009).

В таблице 1 представлен список скоплений, наблюдения которых закончены. В колонках перечислены названия скоплений и отдельно — групп в ассоциации Орион OB1, возраст  $\lg t$ , где  $\sigma$  характеризует разброс между литературными значениями возраста, расстояние  $d$  в пк, количество найденных CP-звезд  $N_{CP}$ .

В нашем исследовании мы опираемся исключительно на материал, полученный в ходе выполнения наблюдательной программы на ОЗСП. Каждая звезда, отображенная по каталогам, наблюдалась

**Таблица 1.** CP-звезды в скоплениях и ассоциациях разного возраста

Скопление	$\lg t \pm \sigma$	$d$ , пк	$N_{CP}$	Ссылки
Orion OB1	6.0–7.0	400	85	[1]
Pleiades	$8.06 \pm 0.09$	150	4	[2,6,7,11]
$\alpha$ Per	$7.81 \pm 0.08$	185	8	[2,4,6,8,9]
NGC 7092	$8.41 \pm 0.15$	330	5	[2,4,5,6,8,10,11]
IC 4756	$8.90 \pm 0.14$	485	6	[2,3,4,6,8,9]

[1] — Brown et al. (1994), [2] — Mermilliod et al. (1997), [3] — Bochanski et al. (2018), [4] — Bossini et al. (2019), [5] — Liu and Pang (2019), [6] — Cantat-Gaudin et al. (2020), [7] — Curtis et al. (2020), [8] — Rain et al. (2021), [9] — Richer et al. (2021), [10] — Dias et al. (2021), [11] — He et al. (2022).

несколько раз в разные фазы периода вращения. Для каждой звезды мы нашли среднеквадратическое поле  $B_{rms}$  и соответствующий критерий  $\chi^2/n$ . Таким образом, была сформирована выборка магнитных и немагнитных CP-звезд для каждого скопления. Звезды с пекулярностью типа HgMn и Am из дальнейшего анализа были исключены по аналогии с подходом, предложенным для Орион OB1 (Semenko et al., 2022). Эти данные послужили основой для расчета доли объектов с магнитным полем среди CP-звезд и среднего среднеквадратического магнитного поля отдельных скоплений. Ниже представлены результаты с комментариями по отдельным скоплениям.

## 3. МАГНИТНЫЕ ЗВЕЗДЫ В СКОПЛЕНИЯХ РАЗНОГО ВОЗРАСТА

### 3.1. Молодые звезды. Ассоциация Орион OB1

В созвездии Ориона находится одна из наиболее изученных в окрестности Солнца ассоциаций Орион OB1. Внутри ассоциации Blaauw (1964) выделил четыре области: подгруппы 1a, 1b, 1c и 1d, которые отличаются по возрасту и звездному составу. Большую часть объектов ассоциации составляют нормальные горячие звезды ГП, остальная же часть — это объекты типа Ae/Be Херbiga, Т Тельца и разного вида аномальные (пекулярные) звезды. Brown et al. (1994) провели наиболее подробный анализ звездного населения ассоциации, которое состоит из 814 звезд спектральных классов O — F.

Опираясь на сведения о составе ассоциации Орион OB1, доступные на начало 2010-х годов, мы выделили, а затем детально исследовали магнитные свойства 56 CP-звезд в ней. Итоги этой работы

**Таблица 2.** Количество химически пекулярных и магнитных CP-звезд в подгруппах ассоциации

Подгруппа	$\lg t$	$N_{\text{CP}}$	$N_{\text{мCP}}$	$\varphi, \%$
1a	7.05	14	7	50
1b	6.23	15	11	73
1c	6.66	24	13	54
1d	< 6.00	3	0	0

были опубликованы Semenکو (2022). Индивидуальные измерения продольного поля с комментариями к каждой звезде публиковались отдельно в цикле работ Romanуuk et al., (2019; 2021a; b).

Для задач настоящего исследования мы адаптировали данные об оценке доли магнитных CP-звезд в подгруппах Орион OB1 из таблицы 4 оригинальной статьи Semenکو et al. (2022) и включили их в виде таблицы 3. В колонках перечислены: возраст  $\lg t$  подгрупп ассоциации,  $N_{\text{CP}}$  — общее количество CP-звезд,  $N_{\text{мCP}}$  — общее количество магнитных CP-звезд,  $\varphi$  — доля магнитных звезд относительно пекулярных.

### 3.2. Скопления умеренного возраста

Проблема оценки принадлежности отдельных объектов к тому или иному скоплению является традиционной для исследований, аналогичных нашему. В базе данных WEBDA (Mermilliod et al., 1997) содержится информация о возрасте, звездном населении, количестве пекулярных звезд, а также фотометрия отдельных звезд для множества рассеянных скоплений. Как правило, этого достаточно, чтобы вынести решение о принадлежности изучаемой выборки к тому или иному скоплению. В своей работе мы дополнительно сравнивали параллаксы из архива миссии Gaia DR3 для отобранных объектов и не рассматривали в дальнейшем те, у которых наблюдается сильное отличие. Результаты отбора CP-звезд в более старых рассеянных скоплениях и индивидуальные измерения их магнитного поля опубликованы нами в работах Romanуuk et al. (2023a; b).

#### Скопление Плеяды

Рассеянное скопление Плеяды (Melotte 22) доступно в северном полушарии и является хорошим объектом для наблюдений на телескопе БТА. Корулов (1987) выделил в скоплении четыре CP-звезды, из которых HD 23950 является ртутно-марганцевой звездой (оригинальные ссылки на работы в Romanуuk et al., 2023a) и исключена из нашего исследования. Из оставшихся трех звезд,

согласно критерию  $\chi^2/n \geq 5$ , слабое магнитное поле возможно обнаружено только у HD 23964. Величина продольного магнитного поля этой звезды находится на пределе нашего обнаружения. Таким образом, наша оценка среднего среднеквадратического магнитного поля для всего скопления получается  $\langle B_{\text{rms}} \rangle = 121 \pm 46$  Гс, а доля магнитных звезд относительно химически пекулярных составляет не более 33%.

#### Скопление $\alpha$ Per

Скопление  $\alpha$  Per насчитывает восемь химически пекулярных звезд, анализ которых выполнили Romanуuk et al. (2023b). Из итоговой выборки были исключены звезды BD +49° 916 и BD +49° 967, так как первая звезда спектрального класса B3 находится на расстоянии более 2 кпк и не может принадлежать старому скоплению, а вторая — имеет характеристики немагнитных Am-звезд.

Таким образом, доля магнитных звезд относительно CP составляет 17%, а величина среднего поля скопления  $\alpha$  Per равна  $\langle B_{\text{rms}} \rangle = 440 \pm 140$  Гс.

#### Скопление NGC 7092

В скоплении NGC 7092 было найдено пять химически пекулярных звезд, магнитное поле которых измерили Romanуuk et al. (2023b). Согласно опубликованным результатам, по-видимому, все CP-звезды принадлежат скоплению, но ни одна из них не удовлетворяет критерию  $\chi^2/n \geq 5$  и не является магнитной.

#### Скопление IC 4756

IC 4756 входит в группу самых старых скоплений из нашей выборки и насчитывает шесть химически пекулярных звезд. Измерению их магнитного поля посвящена работа Romanуuk et al. (2023b). Исходя из анализа доступных данных о параллаксах, звезда HD 171586, вероятно, не принадлежит скоплению и является близкой звездой переднего плана, а звезды HD 171931, HD 172012 и HD 172248 являются немагнитными HgMn-звездами (Renson and Manfroid, 2009) и поэтому были исключены нами из списка потенциально магнитных членов скопления IC 4756. Благодаря одной оставшейся звезде с предельно слабым магнитным полем, долю магнитных звезд в скоплении можно оценить как не более 50%. Среднее поле в скоплении получается  $\langle B_{\text{rms}} \rangle = 310 \pm 140$  Гс.

**Таблица 3.** Результаты измерения среднего магнитного поля исследованных скоплений и подгрупп ассоциации Орион OB1

Скопление	$\lg t$	$N_{\text{CP}}$	$N_{\text{mCP}}$	$\langle B_{\text{rms}} \rangle \pm \sigma$ , Гс
Орион OB1b	6.23	15	11	$1831 \pm 197$
Орион OB1c	6.66	24	13	$1060 \pm 132$
Орион OB1a	7.05	14	7	$909 \pm 197$
$\alpha$ Per	7.81	6	1	$440 \pm 140$
Pleiades	8.06	3	1	$121 \pm 46$
NGC 7092	8.41	5	0	$0 \pm 140$
IC 4756	8.90	2	1	$310 \pm 140$

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всесторонний анализ распределения магнитных CP-звезд в ассоциации Орион OB1 был выполнен Semenکو et al. (2022). Было показано, что имеются достоверные различия как в частоте встречаемости, так и в величине среднего магнитного поля между разными подгруппами ассоциации. В более старых скоплениях мы нашли всего три магнитные звезды из 16 химически пекулярных. В данном разделе мы попытаемся объединить и проанализировать все имеющиеся данные.

В итоговой таблице 4 приведены наши результаты измерения среднего магнитного поля для исследованных скоплений и подгрупп ассоциации Орион OB1. В колонках таблицы указаны название скопления или подгруппы, возраст, количество всех CP-звезд и тех, что являются магнитными, а также среднеарифметическое магнитное поле  $\langle B_{\text{rms}} \rangle$  с соответствующей ошибкой.

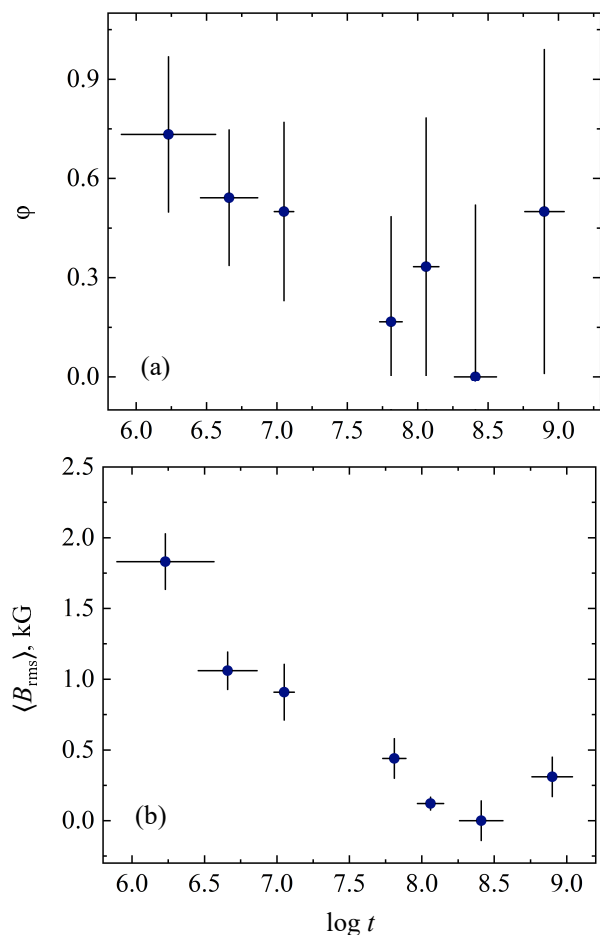
Прежде чем перейти к поиску статических зависимостей между возрастом и частотой встречаемости магнитных звезд, необходимо убедиться в нормальности изучаемых распределений. Используемый нами для этого тест Шапиро–Уилка показывает, что на уровне значимости  $\alpha = 95\%$  значения  $\lg t$  скоплений и соответствующие доли магнитных звезд получены из нормальных распределений ( $p$ -value = 0.85 для  $\lg t$  и  $p$ -value = 0.77 для долей).

Тест Пирсона показывает, что существует слабая корреляция частоты встречаемости магнитных CP-звезд от возраста: соответствующий коэффициент равен  $r = -0.63$  (рис. 1a). Однако статистическая значимость результата недостаточна, поскольку  $p$ -value = 0.13. Из чего мы делаем вывод, что на данной выборке изменения доли магнитных CP-звезд с возрастом обнаружить невозможно. В то же время пренебрегать этим результатом также нельзя.

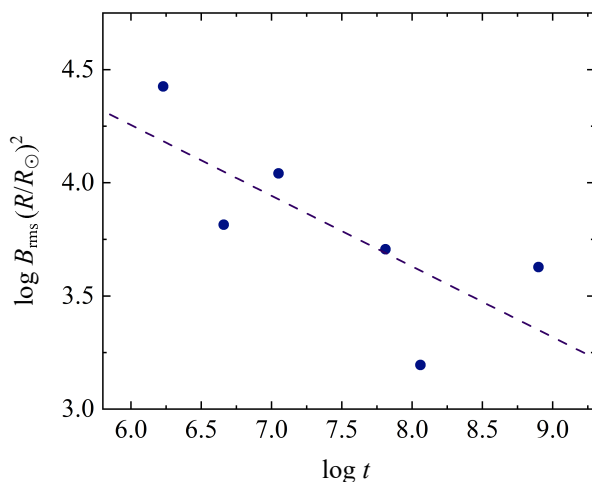
Теоретические модели эволюции магнитных полей массивных звезд, представленные Jermyn and Cantiello (2020), естественным образом предсказывают снижение количества звезд с сильным полем из-за увеличения критической величины поля  $B_c$  с возрастом. Согласно такой модели, поля слабее  $B_c$  эффективно разрушаются конвекцией в приповерхностном слое звезды. К этому процессу добавляется и омическое затухание поля. Все вместе способно привести одновременно и к уменьшению доли звезд с сильным (сотни гаусс и более) полем, и к ослаблению самого поля с возрастом. Мы здесь не упоминаем численные оценки  $B_c$ , поскольку величины, предсказываемые теорией, имеют пока ряд противоречий с наблюдениями (Kochukhov et al., 2023). Но в то же время выводы Jermyn and Cantiello (2020) могут качественно помочь в объяснении того, почему наблюдаемые тренды более выражены для массивных звезд с  $M \geq M_{\odot}$  (Landstreet et al., 2007; Shultz et al., 2019; Semenکو et al., 2022).

Среднее значение магнитного поля скоплений, как следует из анализа нашей расширенной выборки, уверенно уменьшается с возрастом (см. таблицу 4 и рис. 1b). Коэффициент корреляции Спирмена для скоплений равен  $r = -0.91$  с высокой статистической значимостью ( $p$ -value = 0.005). Более строгий ранговый коэффициент Кендалла равен  $t = -0.81$  с  $p$ -value = 0.01. Таким образом, наблюдаемый на рис. 1b тренд к ослабеванию магнитного поля с возрастом скопления имеет статистически значимое подтверждение, однако он не учитывает изменение размеров звезды по мере эволюции. Чтобы компенсировать этот эффект, по аналогии с работами Landstreet et al. (2007) и Semenکو et al. (2022), мы изучили поведение магнитного потока  $\Phi = B_{\text{rms}} R^2$ , где радиус выражен в единицах радиуса Солнца (рис. 2). Оценка радиуса и ряда других параметров звезд в скоплениях была найдена из калибровок и опубликована в статьях Romanуuk et al. (2023a; b). Для звезд в ассоциации Орион OB1 мы использовали ранее опубликованные материалы статьи Semenکو et al. (2022). Как оказалось, все магнитные звезды в скоплениях  $\alpha$  Per, Плеяды и IC 4756 имеют массы около  $3 M_{\odot}$  или несколько больше, а потому сравнивать их поток  $\Phi$  мы будем только со звездами Ориона близких масс.

Зависимость  $\lg \Phi$  от возраста скопления  $\lg t$  можно описать прямой с коэффициентом наклона  $k = -0.31 \pm 0.14$ . Это значение меньше найденного Shultz et al. (2019) ( $k = -0.50$ ) и того, что получается при рассмотрении только магнитных звезд в Орионе ( $k = -0.48$  у Semenکو et al., 2022). Объяснение такой разнице, на наш взгляд, в первую очередь стоит искать в ошибках, которые вносит использование калибровок для определения



**Рис. 1.** Зависимость доли магнитных CP-звезд (a) и среднего магнитного поля (b) от возраста в исследованных скоплениях и подгруппах ассоциации Орион OB1.



**Рис. 2.** Зависимость величины потока  $B_{rms} R^2$  от возраста скоплений.

радиусов и масс весьма ограниченной по размеру выборки звезд.

Для повышения статистической значимости выводов в первую очередь необходимо увеличить количество известных магнитных звезд в скоплениях. В наших предыдущих работах выбор звезд был основан на результатах наземной фотометрии и использовании каталогов с разнородными данными. Высококачественные данные современных обзоров, таких как Gaia, TESS, Kepler и др., обеспечивающие хорошую продолжительность временных рядов и хорошее покрытие неба, в сочетании с результатами спектроскопии и спектрополяриметрии высокого разрешения частично позволяют решить проблему отождествления звезд с аномалиями состава в скоплениях и ассоциациях. Спектроскопия здесь занимает особое место, поскольку, как показал наш обзор CP-звезд в Орионе, имеется большой пробел в измерениях лучевых скоростей, которые являются одним из важнейших критериев членства в скоплениях или иных группах звезд. Для оценки пекулярности звезд также разрабатываются новые методы, которые уже показывают значительную эффективность (например, Hümmerich et al., 2018; Paunzen and Prišegen, 2022; Labadie-Bartz et al., 2023; Yakunin et al., 2023).

На результаты исследований эволюции магнитных CP-звезд в скоплениях, помимо очевидной статистической проблемы полноты выборки, оказывают влияние и эффекты селекции. Во-первых, это быстрое вращение молодых звезд, которое размывает спектральные линии и делает обнаружение слабых магнитных полей у быстрых ротаторов методически трудной задачей. Вращательное уширение может быть причиной малой статистики быстровращающихся звезд со слабыми полями, но не объясняет малое число звезд с сильными полями среди старых звезд. Крайне полезным в этом контексте представляется исследование зависимости верхней границы «магнитной пустыни» как функции вращения, температуры и возраста. Во-вторых, используемая усредненная характеристика магнитного поля звезд  $B_{rms}$  хорошо применима для случаев преимущественно простой конфигурации поля. Усиленный вклад мультиполюсных компонент при усреднении по всей поверхности звезды будет менее выраженным в измеряемой величине продольного поля  $B_e$ . Точный процент CP-звезд с более сложной топологией магнитного поля на сегодняшний день остается неизвестным. Доплер–Зеемановское картирование (Semel, 1989; Kochukhov and Piskunov, 2002; Piskunov and Kochukhov, 2002) позволяет восстановить картину распределения поля и химических элементов, но из-за высоких требований к наблюдательным материалам количество картированных звезд все еще остается незначительным. Судя по данным, опубликованным, например, Kochukhov et al. (2019), дипольная конфигурация все же является преобладающей в первом приближении, а значит влияние

геометрии на статистические выводы об эволюции магнитных полей не является определяющим.

Подводя итог, мы уверенно видим свидетельства отсутствия генерации крупномасштабного магнитного поля химически пекулярных звезд на ГП. Это значит, что поля CP-звезд образовались на более ранних стадиях эволюции. Вопрос механизма зарождения поля все еще остается открытым: это может быть как уплотнение глобального поля Галактики в области звездообразования (Moss, 2003), так и результат взаимодействия (слияния) звезд или протозвездных объектов (Schneider et al., 2019). Наши исследования звезд в ассоциации Орион OB1 (Semenko et al., 2022) указывают на возможную корреляцию между пространственным распределением магнитных звезд и межзвездных облаков газа и пыли, что косвенно указывает на первую гипотезу. Особенно это хорошо видно в области туманности Ориона (Semenko et al., 2022, рис. 11), где молодое население еще не успело улететь от общего очага звездообразования. Следующая задача, которую надо решить, — это понять, являются ли полученные нами результаты присущими только ассоциации Орион OB1 или это общая закономерность для всех CP-звезд. Для этого мы считаем необходимым продолжать наблюдения магнитных звезд в других областях с молодым населением, в частности, в ассоциациях Sco-Cen, Lac OB1 и др.

### БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использовались базы данных WEBDA, SIMBAD, VizieR, NASA's Astrophysics Data System (ADS). Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения, обработка спектрального материала, магнитные измерения и статистический анализ были выполнены благодаря финансированию Российским научным фондом (грант РНФ № 21-12-00147).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Alecian, G. A. Wade, C. Catala, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429** (2), 1001 (2013). DOI:10.1093/mnras/sts383
2. M. Aurière, G. A. Wade, J. Silvester, et al., *Astron. and Astrophys.* **475** (3), 1053 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20078189
3. M. Aurière, G. A. Wade, F. Lignières, et al., *Astron. and Astrophys.* **523**, id. A40 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/201014848
4. H. W. Babcock, *Astrophys. J. Suppl.* **3**, 141 (1958). DOI:10.1086/190035
5. H. W. Babcock, *Astrophys. J.* **132**, 521 (1960). DOI:10.1086/146960
6. S. Bagnulo, J. D. Landstreet, E. Mason, et al., *Astron. and Astrophys.* **450** (2), 777 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20054223
7. A. Blaauw, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **2**, 213 (1964). DOI:10.1146/annurev.aa.02.090164.001241
8. J. J. Bochanski, J. K. Faherty, J. Gagné, et al., *Astron. J.* **155** (4), article id. 149 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aaeabe
9. D. Bossini, A. Vallenari, A. Bragaglia, et al., *Astron. and Astrophys.* **623**, id. A108 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201834693
10. A. G. A. Brown, E. J. de Geus, and P. T. de Zeeuw, *Astron. and Astrophys.* **289**, 101 (1994). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/9403051
11. V. D. Bychkov, L. V. Bychkova, and J. Madej, *Astron. and Astrophys.* **652**, id. A31 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202040215
12. T. Cantat-Gaudin, F. Anders, A. Castro-Ginard, et al., *Astron. and Astrophys.* **640**, id. A1 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/202038192
13. G. A. Chountonov, *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 489 (2016). DOI: 10.1134/S199034131604012X
14. J. L. Curtis, M. A. Agüeros, S. P. Matt, et al., *Astrophys. J.* **904** (2), id. 140 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/abf58
15. W. S. Dias, H. Monteiro, A. Moitinho, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (1), 356 (2021). DOI:10.1093/mnras/stab770
16. L. Fossati, N. Castro, T. Morel, et al., *Astron. and Astrophys.* **574**, id. A20 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201424986
17. J. H. Grunhut, G. A. Wade, C. Neiner, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465** (2), 2432 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw2743
18. Z. He, K. Wang, Y. Luo, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **262** (1), id. 7 (2022). DOI:10.3847/1538-4365/ac7c17
19. S. Hümmerich, Z. Mikulášek, E. Paunzen, et al., *Astron. and Astrophys.* **619**, id. A98 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201832938
20. N. Z. Ismailov, A. F. Kholtygin, I. I. Romanyuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (4), 415 (2021). DOI:10.1134/S1990341321040064



21. M. Jagelka, Z. Mikulášek, S. Hümmerich, and E. Paunzen, *Astron. and Astrophys.* **622**, id. A199 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201833482
22. A. S. Jermyn and M. Cantiello, *Astrophys. J.* **900** (2), id. 113 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/ab9e70
23. O. Kochukhov and N. Piskunov, *Astron. and Astrophys.* **388**, 868 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20020300
24. O. Kochukhov, M. Shultz, and C. Neiner, *Astron. and Astrophys.* **621**, id. A47 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201834279
25. O. Kochukhov, *Proc. Polish Astron. Soc.* **11**, 89 (2020). DOI:10.48550/arXiv.1912.07241
26. O. Kochukhov, H. Gürsoytrak Mutlay, A. M. Amarsi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **521** (3), 3480 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad720
27. I. M. Kopylov, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **24**, 44 (1987).
28. D. O. Kudryavtsev, in *Proc. Int. Meeting on Magnetic Fields of Chemically Peculiar and Related Stars, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia, 1999*, Ed. by Y. V. Glagolevskij and I. I. Romanyuk, (*Spec. Astroph. Obs. RAS, Nizhnij Arkhyz*, 2000), p. 84.
29. J. Labadie-Bartz, S. Hümmerich, K. Bernhard, et al., *Astron. and Astrophys.* **676**, id. A55 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346657
30. J. D. Landstreet, S. Bagnulo, V. Andretta, et al., *Astron. and Astrophys.* **470** (2), 685 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20077343
31. J. D. Landstreet, J. Silaj, V. Andretta, et al., *Astron. and Astrophys.* **481** (2), 465 (2008). DOI:10.1051/0004-6361:20078884
32. F. Lignières, P. Petit, M. Aurière, et al., *IAU Symp.* **302**, 338 (2014). DOI:10.1017/S1743921314002440
33. L. Liu and X. Pang, *Astrophys. J. Suppl.* **245** (2), article id. 32 (2019). DOI:10.3847/1538-4365/ab530a
34. V. Makaganiuk, O. Kochukhov, N. Piskunov, et al., *Astron. and Astrophys.* **525**, id. A97 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201015666
35. E. I. Makarenko, A. P. Igoshev, A. F. Kholtygin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (4), 5813. DOI:10.1093/mnras/stab1175
36. J. C. Mermilliod, M. Mermilliod, and B. Hauck, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **124**, 349 (1997). DOI:10.1051/aas:1997197
37. G. Michaud, *Astrophys. J.* **160**, 641 (1970). DOI:10.1086/150459
38. A. V. Moiseeva, I. I. Romanyuk, and E. A. Semenko, *ASP Conf. Ser.*, **518**, 52 (2019).
39. A. V. Moiseeva, I. Romanyuk, and V. Aitov, in *Proc. Conf. on Multifaceted Universe: Theory and Observations-2022, Nizhny Arkhyz, Spec. Astrophys. Obs. RAS, Russia, 2022*, id. 45 (online at <https://pos.sissa.it/425/045/>). DOI:10.22323/1.425.0045
40. D. Moss, *Astron. and Astrophys.* **403**, 693 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20030431
41. V. E. Panchuk, G. A. Chuntonov, and I. D. Naidenov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 339 (2014). DOI:10.1134/S1990341314030109
42. E. Paunzen and M. Prišegen, *Astron. and Astrophys.* **667**, id. L10 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202244839
43. P. Petit, F. Lignières, G. A. Wade, et al., *Astron. and Astrophys.* **523**, id. A41 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/201015307
44. P. Petit, F. Lignières, M. Aurière, et al., *Astron. and Astrophys.* **532**, id. L13 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201117573
45. N. Piskunov and O. Kochukhov, *Astron. and Astrophys.* **381**, 736 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20011517
46. G. W. Preston, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **12**, 257 (1974). DOI:10.1146/annurev.aa.12.090174.001353
47. M. J. Rain, J. A. Ahumada, and G. Carraro, *Astron. and Astrophys.* **650**, id. A67 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202040072
48. P. Renson and J. Manfroid, *Astron. and Astrophys.* **498** (3), 961 (2009). DOI:10.1051/0004-6361/200810788
49. H. B. Richer, I. Caiazzo, H. Du, et al., *Astrophys. J.* **912** (2), id. 165 (2021). DOI:10.3847/1538-4357/abdeb7
50. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, and D. O. Kudryavtsev, *Astrophysical Bulletin* **68** (3), 300 (2013). DOI:10.1134/S1990341313030061
51. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, et al., *Astrophysical Bulletin* **71** (4), 436 (2016). DOI:10.1134/S1990341316040064
52. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, I. A. Yakunin, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 165 (2017). DOI:10.1134/S1990341317020079
53. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **74** (1), 55 (2019). DOI:10.1134/S199034131901005X
54. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (1), 39 (2021a). DOI:10.1134/S1990341321010090
55. I. I. Romanyuk, E. A. Semenko, A. V. Moiseeva, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (2), 163 (2021b). DOI:10.1134/S1990341321020085
56. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, I. A. Yakunin, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (1), 36 (2023a). DOI:10.1134/S1990341323010078
57. I. I. Romanyuk, A. V. Moiseeva, I. A. Yakunin, and V. N. Aitov, *Astrophysical Bulletin* **78** (2), 152 (2023b). DOI:10.1134/S1990341323020062
58. F. R. N. Schneider, S. T. Ohlmann, P. Podsiadlowski, et al., *Nature* **574** (7777), 211 (2019). DOI:10.1038/s41586-019-1621-5
59. M. Schöller, S. Hubrig, L. Fossati, et al., *Astron. and Astrophys.* **599**, id. A66 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201628905
60. M. Semel, *Astron. and Astrophys.* **225**, 456 (1989).

61. E. Semenko, I. Romanyuk, I. Yakunin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515** (1), 998 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac1864
62. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, and I. A. Yakunin, *Astrophysical Bulletin* **69** (2), 191 (2014). DOI:10.1134/S1990341314020060
63. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, et al., *ASP Conf. Ser.*, **518**, 31 (2019). DOI:10.48550/arXiv.1905.08950
64. M. E. Shultz, G. A. Wade, T. Rivinius, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **490** (1), 274 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz2551
65. J. Sikora, G. A. Wade, J. Power, and C. Neiner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (2), 2300 (2019a). DOI:10.1093/mnras/sty3105
66. J. Sikora, G. A. Wade, J. Power, and C. Neiner, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483** (3), 3127 (2019b). DOI:10.1093/mnras/sty2895
67. D. W. N. Stibbs, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **110**, 395 (1950). DOI:10.1093/mnras/110.4.395
68. G. A. Wade, C. Neiner, E. Alecian, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456** (1), 2 (2016). DOI:10.1093/mnras/stv2568
69. I. A. Yakunin, E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (2), 141 (2023). DOI:10.1134/S1990341323020128

## Origin and Evolution of Large-Scale Magnetic Fields of Chemically Peculiar Stars. I. Intermediate-Age Clusters

I. I. Romanyuk<sup>1</sup>, I. A. Yakunin<sup>1</sup>, A. V. Moiseeva<sup>1</sup>, E. A. Semenko<sup>1,2</sup>, D. O. Kudryavtsev<sup>1</sup>, and V. N. Aitov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>National Astronomical Research Institute of Thailand, Chiangmai, 50180 Thailand

Chemically peculiar (CP) stars of early spectral types are the only Main-Sequence objects of the Hertzsprung–Russel diagram that have strong magnetic fields covering the entire surface of a star and maintaining a stable structure on a scale of at least decades. The origin and evolution of magnetic fields of CP stars are still a subject of discussion, despite significant progress in the field of observation of stellar magnetic fields and their theoretical description. This situation has developed not least because of the problem of accurately determining the age of CP stars. We performed a review of magnetic fields of CP stars in the Orion OB1 association and five intermediate-age clusters ( $\alpha$  Per, Pleiades, NGC 7092, and IC 4756) and found evidence of a strong decrease in the proportion and strength of magnetic fields of CP stars relative to normal stars of the same spectral types. The found dependences can serve as confirmation of the fossil nature of large-scale magnetic fields of stars. The conclusions of the this paper are based on the measurements of more than 800 spectra obtained in the period from 2013 to 2023 with the Main Stellar Spectrograph of the 6-m BTA Telescope for about 100 stars.

Keywords: *stars: magnetic field—stars: chemically peculiar*